2001춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

HYPER용 합금형 및 분산형 핵연료 열전도도 및 온도분포 분석

Analysis on the Temperature Profile and the Thermal Conductivities of the Metalic and the Dispersion Fuel Rods for HYPER

이병운, 황완, 이봉상, 박원석

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

HYPER용 핵연료로 합금형 및 분산형 금속핵연료가 고려되고 있지만, HYPER용 핵연료는 TRU연료로서 현재 열전도도 등의 재료특성과 같은 실험 데이터가 없는 실정이다. 본 논문에서는 Pu-Zr합금의 열전도도를 U-Zr합금의 열전도도로부터 유추하였으며, 분산형핵연료의 경우에는 기존의 Maxwell방정식이 아닌 Bruggeman 방정식을 이용하여 열전도도를 유추하였다. 이들 열전도도를 각각 MACSIS-H 및 DIMAC 코드의 온도분포 모듈에 설치하였으며, 이에따른 핵연료봉 반경방향 온도분포, 선출력에 따른 연료중심온도 분포 및 Zr 함량에 따른 온도분포를 분석하였다. 본 논문에서 유추하여 설치한 열전도도는 매우 보수적인 값이므로 핵연료성능분석 및 개념설계시 유용하지만 실험을 통한 검증이 필요하다.

Summary

Either metal or dispersion fuel is considered as the blanket fuel for HYPER, but there are few material characteristics data such as the thermal conductivity of TRU. In this paper, the thermal conductivity of Pu-Zr alloy was developed based on that of U-Zr alloy and the thermal conductivity of dispersion fuel was developed based on Bruggeman equation instead of Maxwell equation. These thermal conductivity models are inserted into MACSIS-H and DIMAC, respectively. So, radial temperature distribution of each typical fuel, fuel centerline temperature with linear heat rate, temperature distribution with Zr fraction are calculated. However, the value of thermal conductivities in this paper are likely to conservative, experimental evaluation should be needed even though it is available for the performance analysis and conceptual design for blanket fuel.

1. 서론

HYPER용 핵연료로 합금형 및 분산형 금속핵연료가 고려되고 있다. 이에따라 합금형 핵연료 성능분석을 위하여 MACSIS-H[1]가 개발되고 있으며, 분산형 핵연료 성능분석을 위하여 DIMAC[2]이 개발되고 있다. 하지만 HYPER용 핵연료는 TRU연료로서 핵연료성능분석을 위해 기본적인 자료가 되는 열전도도, 열팽창 등의 재료특성과 같은 실험 데이터가 없는 실정이다. 또한 실험을 하기위해서는 예산 및 핵연료물질제조 등 여러가지 제약조건이 많은 실정이며, 실험이전에 핵연료의 개념설계를 위하여 어떠한 핵연료가 어떠한 성능을 나타낼 수 있을 지 예상할 필요가 있다.

본 논문에서는 TRU 물질자체의 재료특성은 거의 없는 실정이므로, TRU의 대부분을 차지하는 Pu의 특성을 TRU 특성이라고 간주하였다. 이에 따라 Pu-Zr합금의 열전도도를 U-Zr 합금의 열전도도로부터 유추한 후, 합금형 및 분산형 핵연료의 열전도도를 구하여 이들 열전도도를 각각 MACSIS-H 및 DIMAC 코드의 온도분포 모듈에 설치하였으며, 이에따른 핵연료봉 온도분포 및 민감도분석을 수행하였다.

2. 합금형 핵연료 열전도도

현재 Pu-Zr 합금에 대한 열전도도 자료가 없으므로 U-Zr 합금의 열전도도를 기본으로 하여 Pu-Zr 합금에 대한 열전도도를 유추하였다. U-Zr 합금에 대한 열전도도는 표 1과 같다[3].

표 1. Thermal conductivity data for U-Zr alloys (W/mK).

Temp, K	Uranium	U-1.5wt%Zr	U-5wt%Zr	U-20wt%Zr	U-40wt%Zr
293	27.0	22.6	19.0	11.0	7.0
373	29.1	24.0	21.0	13.0	8.0
473	31.1	26.0	23.0	15.0	10.0
573	33.4	28.5	25.0	17.0	12.0
673	35.8	31.0	28.0	20.0	14.0
773	38.2	34.0	31.0	22.0	17.0
873	40.6	37.0	34.0	25.0	20.0
973	43.2	40.5	37.0	28.0	24.0
1073	45.7	44.5	41.0	31.0	28.0
1173	48.3	no data	44.0	34.0	33.0

α 플루토늄의 열전도도는 3.3~41W/mK이라고 나타나 있지만[4], 합금화되지 않은 입방형 δ 및 ε 플루토늄에 대한 열전도도 자료는 아직 없는 실정이다. α 플루토늄의 열전도도값의 범위가 큰 이유는 자체 가열효과 및 여러가지 순도의 표본을 측정하였기 때문이라고 판단된다. β 플루토늄의 열전도도는 140°C에서 15.4 W/mK로서 측정되었다.

이와 같이 플루토늄의 열전도도는 현재까지 정량화하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 Pu-1wt%Al의 열전도도를 이용하였다[3]. 아주적은 양의 Al이 포함된 Pu-1wt%Al의 열전도도를 Pu의 열전도도로 가정하여 Pu-Zr합금의 열전도도를 유추하였다. 그림 1은 U, U-20wt%Zr, Pu-1wt%Al, Pu-28wt%Zr의 열전도도를 나타낸다[3], [5].

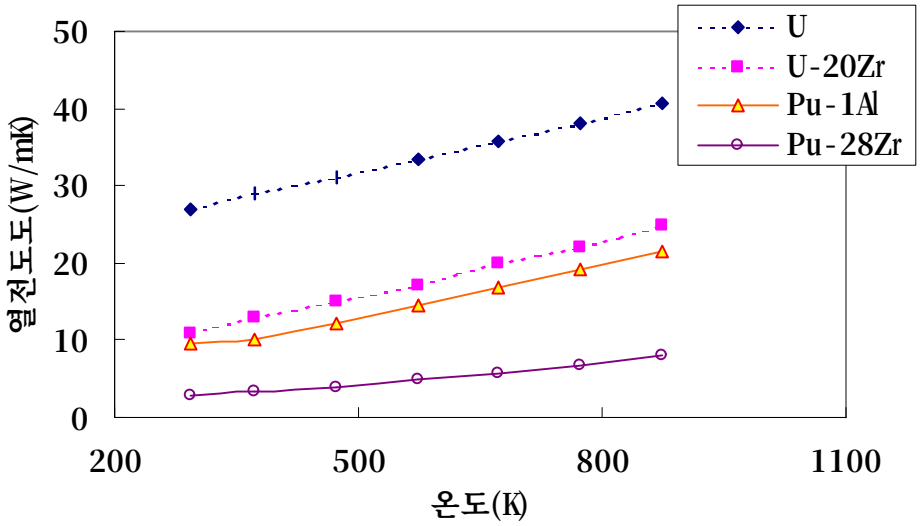

그림 1. U, U-20wt%Zr, Pu-1wt%Al, Pu-28wt%Zr의 열전도도

그림1에서 보는 바와 같이, 우라늄과 Pu-1Al의 열전도도는 정확하지는 않지만 어떠한 비율로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 합금화되지 않은 우라늄과 Pu-1Al 열전도도의 비는 20°C에서 약 27/9.5=0.351로 유추하였으며, 이들 열전도도는 역시 U-Zr 합금과 마찬가지로 온도에 따른 함수라고 고려한다. 따라서 표 1에 나타난 U-Zr 합금 열전도도에 0.351을 곱하여 이들을 Pu-Zr의 열전도도로 고려한다. 이들 값은 표 2와 같다.

Table 2. Estimated thermal conductivity of Pu-Zr alloys (W/mK).

Temp, K	Plutonium	Pu-1.5Zr	Pu-5Zr	Pu-20Zr	Pu-40Zr
293	9.5	7.9	6.7	3.9	2.5
373	10.2	8.4	7.4	4.6	2.8
473	10.9	9.1	8.1	5.3	3.5
573	11.7	10.0	8.8	6.0	4.2
673	12.6	10.9	9.8	7.0	4.9
773	13.4	11.9	10.9	7.7	6.0
873	14.3	13.0	11.9	8.8	7.0
973	15.2	14.2	13.0	9.8	8.4

하지만 표 2에 나타난 값들은 매우 보수적인 값이라고 볼 수 있다. U-Zr 합금에서는 우라늄이 지르코늄보다 열전도도가 높기 때문에 지르코늄의 함량이 많아지면 열전도도가 더욱 더 빨리 감소하게 된다. Pu-Zr합금도 지르코늄 함량이 낮을 경우에는 역시 열전도도가 U-Zr합금의 추세를 따를 것으로 예상되며, U-Zr합금도 지르코늄 함량이 어느 정도 이상되면 열전도도가 증가하는 추세를 보일 것이다. 그러나 Pu-Zr합금에서는 Pu의 열전도도가 Zr보다 낮기 때문에 U-Zr합금에서 보다 더 낮은 지르코늄 함량에서 증가추세를 보일 것으로 예상된다.

표 2의 데이터를 다중 선형 회귀 분석법을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{Pu\text{-}Zr} = 7.488 + 3.43\times10^{-3}T - 32.53X_{Zr} + 4.33\times10^{-6}T^2 + 39.97(X_{zr})^2 - (7.843\times10^{-4})TX_{zr} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여, Pu-Zr 합금의 Zr함량에 따른 열전도도를 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에 있는 값들은 식 (1) 자체가 Zr 함량이 매우 많아지는 경우에 대해서는 열전도도 변화를 수용하지 못하기 때문에 5-50%Zr함량까지만 사용되어야 한다.

하지만 현재 HYPER용 합금핵연료로 고려되고 있는 금속핵연료의 성분은 TRU-(10-50)wt%Zr이기 때문에 식 (1)은 사용가능할 것으로 판단된다. 이에 따라 합금형 핵연료성능분석 코드인 MACSIS-H에 식(1)을 삽입하여 핵연료봉 온도분포를 분석하였다.

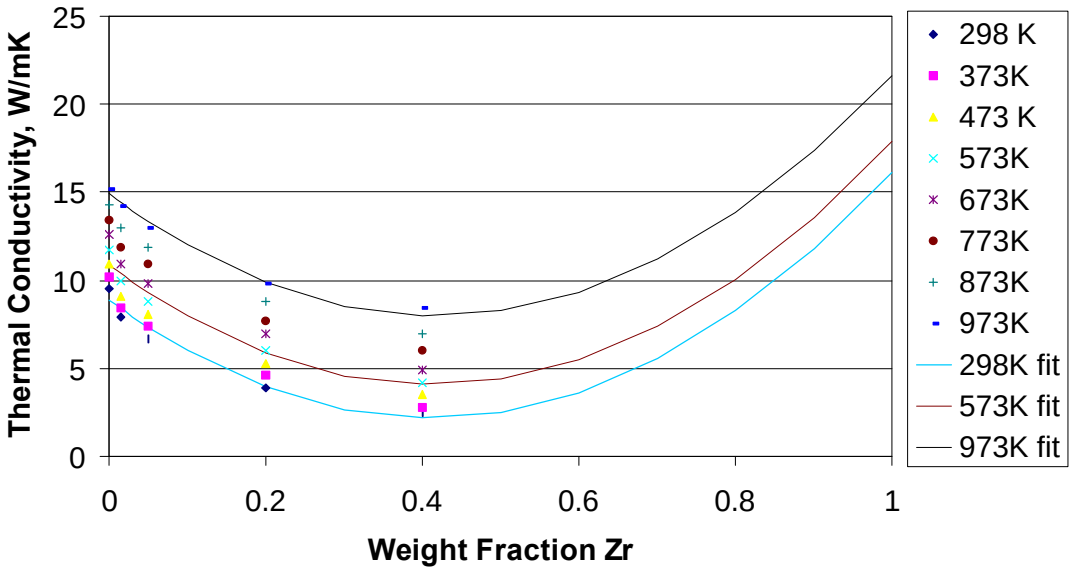

그림 2. Zr함량에 따른 Pu-Zr 합금의 열전도도

3. 분산형 연료의 열전도도 모델

2상 재료의 열전도도를 구하는 모델은 매우 많으며, 그중에서도 Hashin[6]의 모델은 2상 재료의 열전도도 상하경계를 결정하는 데 매우 많이 이용되고 있다. 또한 여러가지 형태의 Maxwell 방정식이 2상 계통에 대한 열전도도를 구하기 위해서 사용되고 있으며, 그중 Maxwell-Euken 방정식이 가장 많이 사용되고 있다[7]. 이 방정식은 2상 재료에 있어서 구형 입자의 분율이 매우 낮을 때 주로 사용되며 식 (2)와 같다.

$$K_f = K_c \frac{2K_c + K_d - 2b(K_c - K_d)}{2K_c + K_d + b(K_c - K_d)} \quad (2)$$

여기서 $b=V_d/(V_c+V_d)$, V_c는 기지의 전체부피, V_d 는 입자 전체부피, K_f는 분산물의 열전도도, K_c는 기지의 열전도도이고, K_d 는 구형입자의 열전도도이다.

Maxwell 방정식은 여러가지 경계조건 및 변수들의 범위에 대한 한계치가 있기 때문에 더 일반적인 방정식은 Bruggeman에 의해 유도된 방정식을 사용할 수 있다[7]. Bruggeman 방정식은 입자 및 기지의 분율에 상관없이 적용될 수 있으며, 2상 재료중 하나의 상이 다른 상에 완전히 둘러 쌓이지 않은 상의 혼합물에도 적용되며, 또한 구형입자에도 적용될 수 있는 매우 일반적인 방정식으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{K_c - K_f}{K_c + 2K_f} = \frac{V_d}{1 - V_d} \cdot \frac{K_f - K_d}{2K_f + K_d} \quad (3)$$

여기서 변수들은 식 (2)의 변수와 같다.

(U-Mo)-Al 분산형 핵연료의 열전도도가 ANL 및 KAERI에서 측정되었다. 그림 3은 ANL및 KAERI에서 측정한 값 및 식(2) 및 식 (3)을 이용한 (U-Mo)-Al 분산형 핵연료의 열전도도를 나타낸다. 그림 3에서 보는 바와 같이 Maxwell-Euken 방정식은 입자의 분율이 커질수록 분산형핵연료의 열전도도를 과도평가하는 경향을 보인다. 그러나 Bruggeman방정식은 입자의 분율에 상관없이 측정된 데이터와 매우 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. (U-Mo)-Al 분산형 핵연료의 열전도도 예측면에서 있어서 Bruggeman방정식이 훨씬 우수하기 때문에 분산형 연료의 열전도도 방정식으로 채택하는 것이 타당하다고 판단된다.

이에 따라 Bruggeman방정식을 분산형핵연료 성능분석 코드인 DIMAC에 삽입하였으며, 이에따른 핵연료봉 분포를 계산하였다.

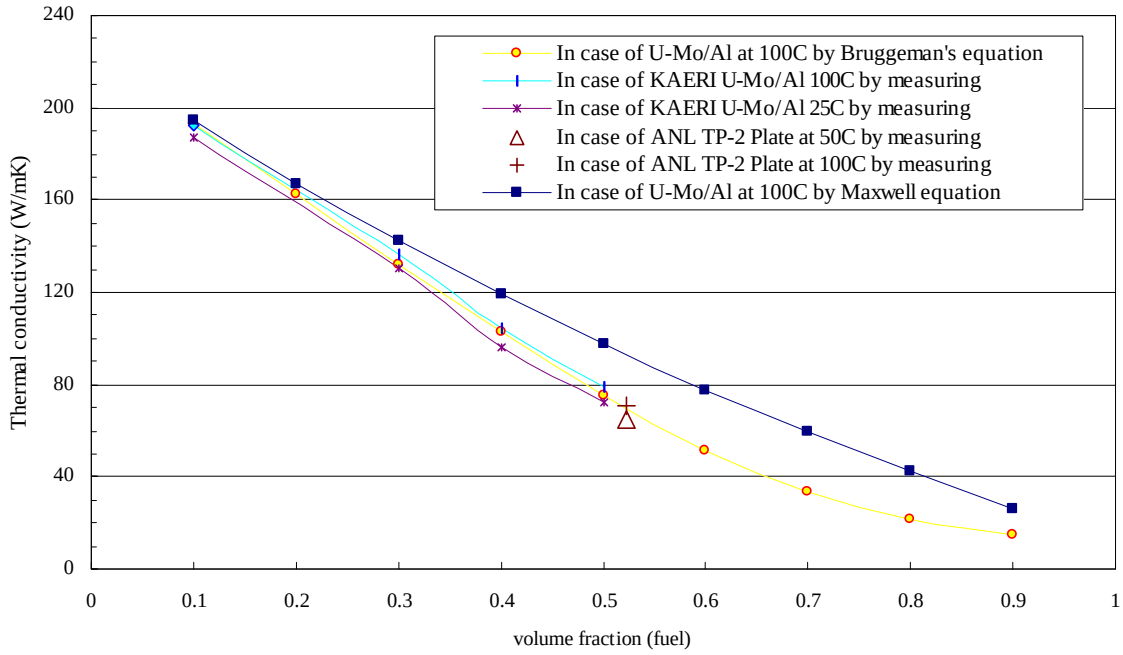

그림 3. (U-Mo)-Al 열전도도 측정값, Maxwell-Euken 방정식 및 Bruggeman 방정식 계산값과의 비교

4. 분산형 및 합금형 핵연료의 열전도도 및 온도분포 비교분석

4.1 분산형 및 합금형 핵연료의 열전도도

분산형 및 합금형 핵연료의 열전도도는 식 (1) 및 식 (3)을 이용하여 계산된다. 열전도도는 온도의 함수이며, 이를 나타내면 그림 4와 같다. 또한 그림 5에는 U-Pu-Zr 합금 연료 및 (U-Pu-Zr)-Zr 분산형 핵연료의 열전도도도 함께 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Pu의 영향 때문에 Pu-Zr 합금형 핵연료보다 분산형 핵연료가 열전도도가 훨씬 좋으며, 이보다도 (U-Pu-Zr)-Zr 분산형 핵연료의 열전도도가 좋다는 것을 알 수 있다.

4.2 합금형 및 분산형 반경방향 온도분포

TRU-50Zr 합금형 및 (TRU-20Zr)-Zr분산형 핵연료의 열전도도를 각각 MACSIS-H 및 DIMAC에 설치하여 반경방향 온도분포를 계산하였으며, 그 결과는 그림 5와 같다. 또한 그림 5에는 DIMAC 온도분포의 검증을 위한 Heating 7.2 코드의 계산 결과 및 (U-10Pu-20Zr)-Zr 분산형 연료의 온도분포도 나타내었다.

분산형연료의 경우 연료 중심에서 피복관 외부표면까지의 온도차는 냉각재 온도가 613K 일경우 150K이며, 연료 중심 온도는 815K이다. 합금형 연료의 경우 연료 중심에서 피복관 외부표면까지의 온도차는 냉각재 온도가 613K일경우 약 300K이며, 연료 중심 온도는 약 1000K이다. 이는 TRU의 열전도도가 매우 낮기 때문에 분산형 연료의 열전도도가 좋기때문이며, 따라서 Zr의 분율에 따른 온도분포 분석 및 선출력에 따른 연료중심 온도 분석이 필요하다.

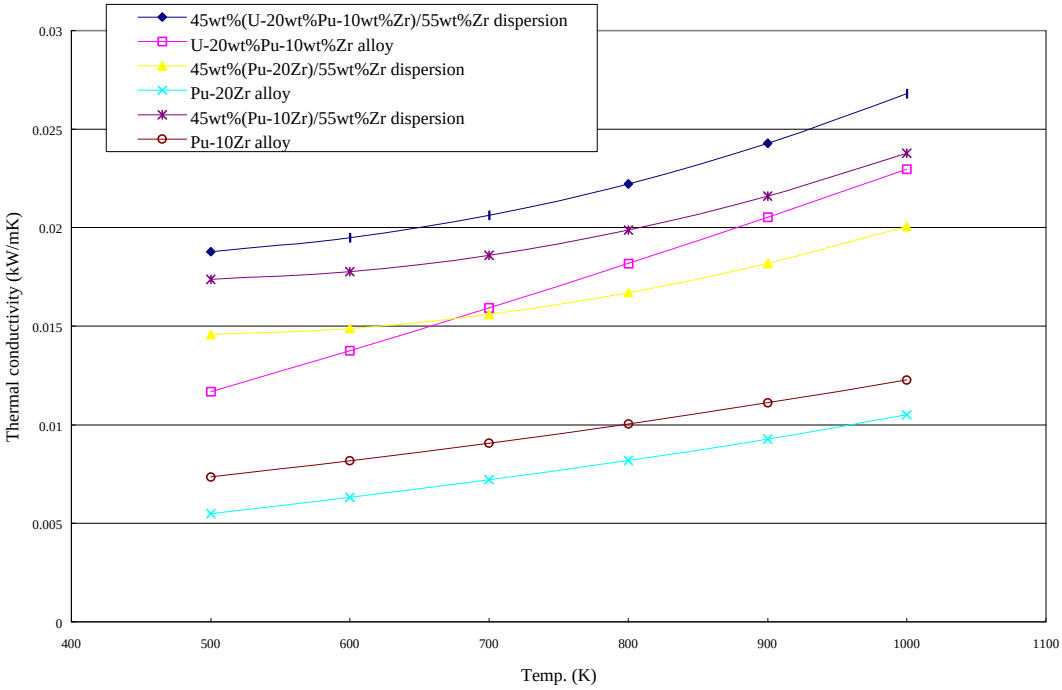

그림 4. 합금형 및 분산형 핵연료의 열전도도 비교

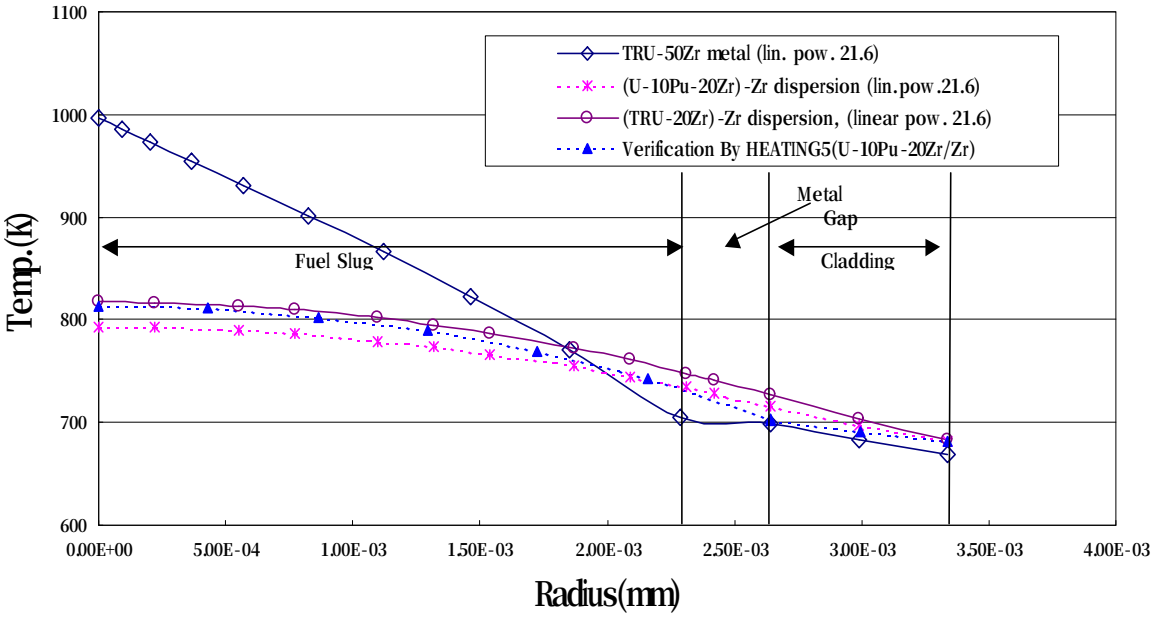

그림 5. 분산형 및 합금형 핵연료의 반경방향 온도분포 (at BOL)

4.3 합금형 및 분산형의 선출력에 따른 연료중심온도 분포

그림 6은 선출력에 따른 합금형 및 분산형의 연료중심온도 분포를 나타낸다. Pu-Zr 합금의 경우 용융온도는 Zr함량의 함수로서 Zr의 함량이 높아질수록 용융온도가 올라가며, Pu-50Zr의 경우 약 1600K 이상이라고 되어있기 때문에 이에 대한 분석이 필요하다. 핵연료의 중심온도는 선출력의 함수이므로, 어느 정도 선출력이 되면 용융온도를 초과할 수 도 있다. 하지만 현재 HYPER에서 고려하고 있는 선출력에서는 용융온도를 넘어가지는 않을 것으로 보이며, 또한 분산형핵연료가 훨씬 유리한 것으로 나타났다.

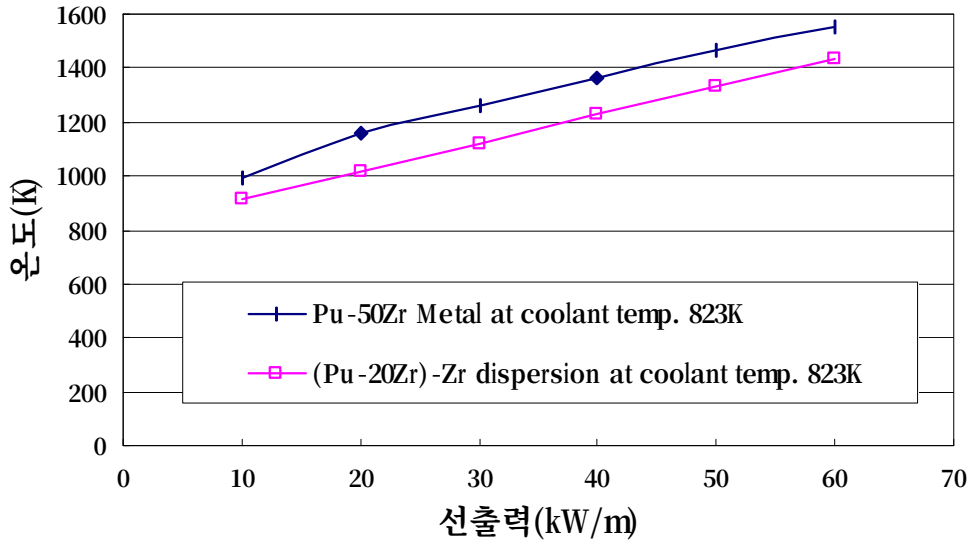

그림 6. 선출력에 따른 합금형 및 분산형 핵연료의 중심 온도 (at BOL)

4.4 합금형 및 분산형의 Zr 함량에 따른 온도분포

그림 7은 Zr 함량에 따른 합금형 및 분산형 핵연료의 반경방향 온도분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 합금형 핵연료의 경우 Zr의 분율이 10%인 경우에는 핵연료중심과 피복관 표면까지의 온도차가 약 280K이지만, 분율이 50%인 경우에는 약 330K로, Zr 분율이 낮을수록 온도차가 적다는 것을 알 수 있다. 분산형 연료의 경우에는 입자의 경우 합금형과 같은 추이를 보이지만, 기지물질인 Zr의 함량이 늘어나면 온도차가 적어진다는 것을 알 수 있다.

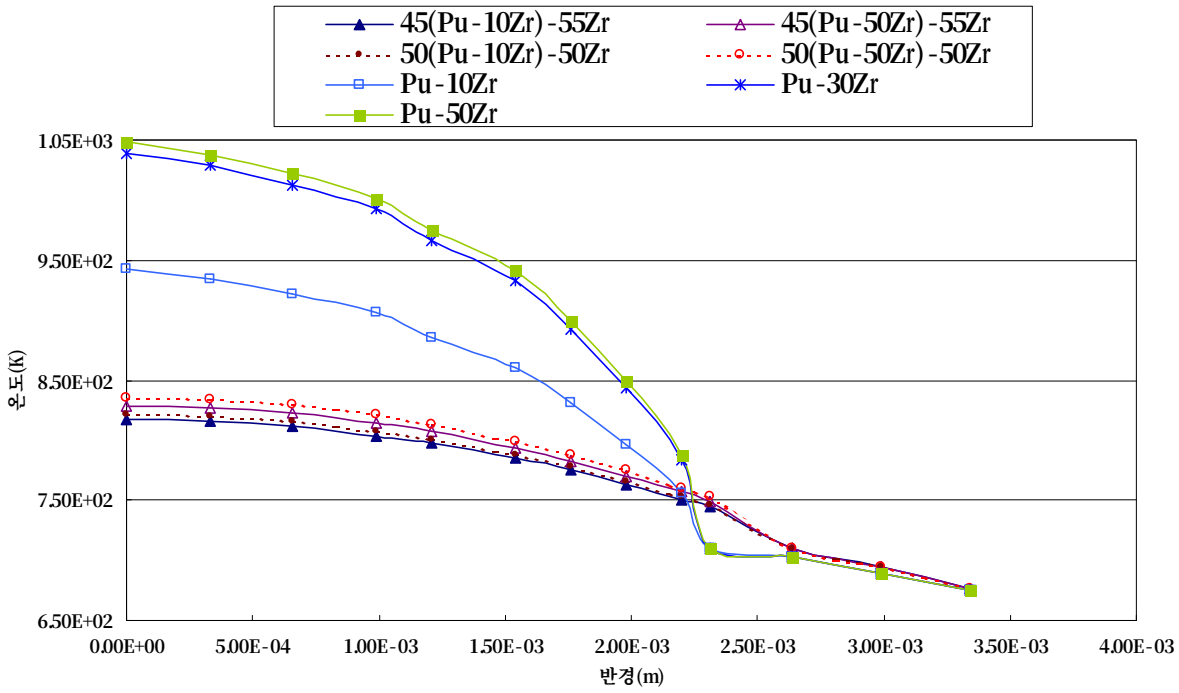

그림 7. Zr 함량에 따른 합금형 및 분산형 핵연료의 반경방향 온도분포 (at BOL)

5. 결론

본 논문에서는 TRU핵연료의 열전도도를 유추하기 위하여 TRU의 대부분을 차지하는 Pu의 특성을 TRU 특성이라고 간주하였다. 이에 따라 Pu-Zr합금의 열전도도를 U-Zr합금의 열전도도로부터 유추하였으며, 분산형핵연료의 경우에는 기존의 Maxwell방정식이 아닌 Bruggeman 방정식을 이용하여 (Pu-Zr)-Zr 분산형 연료의 열전도도를 유추하였다. 이러한 합금형 및 분산형 핵연료의 열전도도를 각각 MACSIS-H 및 DIMAC 코드의 온도분포 모듈에 설치하였으며, 이에따른 핵연료봉 온도분포 및 민감도분석을 수행하였다.

분산형 및 합금형 핵연료의 열전도도 분석결과, TRU핵연료의 경우에는 분산형 핵연료의 열전도가 합금형 핵연료보다 높은 것으로 나타났다.

합금형 및 분산형 반경방향 온도분포는 연료중심에서 피복관 표면까지 합금형의 경우 약 300K, 분산형의 경우 약 150K인 것으로 나타났다.

합금형 및 분산형의 선출력에 따른 연료중심온도 분포의 경우 현재의 HYPER 설계에서는 상당한 여유를 가지고 있는 것으로 나타났다.

합금형 및 분산형의 Zr 함량에 따른 온도분포는 합금형핵연료의 경우 Zr분율이 낮을수록 온도분포가 낮으며, 분산형의 경우는 기지물질인 Zr이 높을수록 온도분포가 낮은 것으로 나

타났다.

현재 설치되어있는 Pu-Zr 합금의 열전도도는 분석을 위하여 매우 보수적인 값을 취하고 있으므로 핵연료성능분석 및 개념설계시에는 보수적인 분석을 위해서 매우 유용하지만 이를 확인할 수 있는 실험을 통한 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] W.Hwang et al., ”Preliminary Analysis on the Temperature Profile of Blanket Rod for HYPER” Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Seoul, Korea, Oct 1999.

[2] 이병운 외 3인, HYPER용 (TRU-Zr)-Zr 분산형핵연료봉 온도분포 모델링 및 예비 분석, 2000한국원자력학회 추계발표회논문집, 2000.

[3] Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho (eds.) Thermophysical Properties of Matter, Volume 1, IFI/Plenum (1970).

[4] J.J. Katz, G.L. Seaborg, L.R. Morss, The Chemistry of the Actinide Elements, Chapman and Hall (1986).

[5] Personal communication with Mitchell K. Meyer (ANL) et al.

[6] Z. Hashin, S. Shtrikman, “A variational Approach to the Theory of the Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials,” *J. App. Phys.* **33** [10] (1962).

[7] J.P.Stora, “Thermal conductivity of Two Phase Solid Bodies,” *Nuc. Tech.*, **17** (March, 1973).